红砂灌丛沙堆土壤粒度组成及养分积累特征

李小乐[1]，魏亚娟[1]，党晓宏[1,2]，戴玉芝[3]，翟　波[1]，
迟　旭[1]，吴惠敏[1]

（1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院，内蒙古　呼和浩特　010018；2. 内蒙古杭锦荒漠生态系统国家定位观测研究站，内蒙古　鄂尔多斯　017400；3. 呼和浩特气象站，内蒙古　呼和浩特　010018）

摘　要：为探究荒漠灌丛对其沙堆土壤结构和养分空间异质性的影响，以白音恩格尔自然保护区的优势种红砂（*Reaumuria soongorica*）灌丛沙堆为研究对象，对其土壤粒度组成及土壤养分积累特征进行分析。结果表明：(1) 研究区土壤粒径组成以细砂为主，含量为36.34%~65.31%，黏粒、粉粒含量均小于7.00%；(2) 红砂灌丛沙堆沉积物趋于细化，由背风侧、迎风侧到沙堆间空地土壤颗粒分选性依次变差，峰态逐渐宽平，分形维数逐渐变小，灌丛沙堆土壤粒径组成含量分布较丘间空地更对称；(3) 灌丛沙堆迎风侧和背风侧有机质（SOM）、碱解氮（AN）、速效磷（AP）、速效钾（AK）含量分别较沙堆间空地增加29.37%和40.63%、23.49%和35.12%、62.72%和66.45%、30.10%和22.75%（$P<0.05$），且相对作用强度（Relative Interaction Intense, RII），即RII>0。红砂灌丛起到防风滞沙和重新分选沙粒的作用，并且在丛间地风蚀和植物反馈作用下养分向灌丛沙堆富集，形成“肥岛”效应。

关键词：红砂；灌丛沙堆；土壤粒度；养分积累

灌丛可截获风沙流中凋落物及细颗粒，使其沉积于灌丛下方形成沙堆，是沙源、风力、植被三者协同作用而形成的动力平衡态[1]。在生物和非生物作用下，土壤资源向灌丛聚集的现象称为“肥岛效应”[2]。“肥岛效应”揭示了灌丛对土壤养分的保护和利用机制，对于加强干旱地区植物资源恢复和利用有重要意义。同时“肥岛”效应促进灌丛发育进而影响微地形地貌的沉积特征，沙堆沉积物中包含大量区域环境变化信息，可综合反映沉积区动力环境和物质来源，是描述区域土壤风蚀与土地退化状况的重要参数指标[3]。因此，灌丛沙堆的土壤沉积特征和养分积累特征近年来成为研究热点。

沙堆的形成发育依附灌丛生长，灌丛死亡后沙堆也随之退化消散[4]，不同植物种因其拦截能力、根系分泌、自身凋落物等方面差异导致沙堆土壤理化性质出现差异[5]。另一方面，不同区域因其环境和沙源条件差异，最终在灌丛沙堆的沉积特征方面也产生较大不同[6]。前人研究发现了灌丛对干旱区生态微环境的防护作用以及沙堆对环境稳定性的指示作用，但将灌丛与沙堆视为一个有机整体，探讨其与土壤风蚀和荒漠化防治之间的耦合关系，测定沙堆指示作用的可靠度和灵敏度仍需要进一步研究。

红砂（*Reaumuria soongorica*）属于超旱生小灌木，因其抗干旱、耐贫瘠的特点在环境恶劣的白音恩格尔自然保护区广泛分布，并形成规模小、密度高的稳定种群[7]。红砂灌丛发挥着防风固沙和改良土壤肥力的作用，并为研究区生态系统和生物多样性的恢复及区域水土保持提供保障[8-10]。因此，本文将红砂灌丛与沙堆这一有机整体作为研究对象，探究风蚀影响下红砂灌丛对沙堆土壤结构和养分的防护作用，以期揭示红砂灌丛对沙堆土壤粒度组成及养分积累的影响规律，为荒漠生态治理提供理论依据与数据支持。

1 研究区概况

研究区地处鄂尔多斯高原西北缘白音恩格尔自然保护区（107°02′~107°19′E；40°08′~40°23′N），属中温带大陆性季风气候区，年均气温4.7~7.0 ℃，年降水量144~340 mm，且主要集中在6—8月。研究区光能资源丰富，年均日照时长3129.5 h，年潜在蒸发量2278.7~3274.7 mm。风向以偏西北风为主，年平均风速3.2 $m\cdot s^{-1}$，最大风速可达24.2 $m\cdot s^{-1}$。研究区处于丘陵和平原交界处，西南方向地形属低山丘陵，地势起伏较小，东北方向为较平坦的平原地貌。土壤类型主要为灰漠土和风沙土，表现为土壤水分少、养分贫瘠，矿质部分以细砂为主。研究区域优势种为红砂（图1），植被覆盖度40%~60%，伴生少量猫头刺（*Oxytropis aciphylla*）和沙蒿（*Artemisia desertorum*）。植物所需水分多来自天然降水，地下水埋深大于15 m[11]。

2 研究方法

2.1 样品采集

于2021年4月上旬进行试验，选择地势平坦处设置50 m×50 m的标准样地，以东西方向为*X*轴，南北方向为*Y*轴，沿西南角至东北角的对角线，等距离划分3个10 m×10 m的小样方，用卷尺对小样方内全部红砂灌丛短轴（W_g）、长轴（L_g）、株高（H_g）及沙堆的短轴（W_d）、长轴（L_d）、高度（H_d）测量，计算灌丛冠幅（*C*）、沙堆底面积（S_d）和沙堆体积（V_d）（表1）。计算公式如下：

$$C=(W_g+L_g)/2 \quad (1)$$

因红砂灌丛沙堆呈椭圆形[12]，计算公式如下：

$$S_d=1/4\times\pi\times L_d\times W_d \quad (2)$$

$$V_d=1/6\times\pi\times L_d\times W_d\times H_d \quad (3)$$

每个小样方内选取3丛发育良好且具有代表性的红砂灌丛，在灌丛沙堆迎风侧、背风侧和灌丛间空地的位置，用内径5 cm的土钻对0~15 cm土层土壤样品进行采集，每5 cm为一层，分为0~5 cm，5~10 cm和10~15 cm。将3个小样方相同土层土壤进行混匀后分成3份，为3次重复处理，共27份，用于土壤粒度组成和土壤养分测定。

2.2 样品测定

采集的土壤样品置于实验室内自然风干。去除土壤中杂质后过2 mm筛用以土壤养分及土壤粒度组成测定，再过0.149 mm筛用以土壤有机质测定。有机质（SOM）选择硫酸消煮-重铬酸钾外加热法；碱解氮（AN）选择NaOH碱解扩散法；速效磷（AP）选择$NaHCO_3$浸提-钼锑抗比色法；速效钾（AK）选择醋酸铵浸提-原子吸收分光光度计法。取10 g土样加至50 mL玻璃烧杯内，加入45 mL蒸馏水浸没土样后加入1~2滴30%H_2O_2，静置24 h，用以去除土样中有机质。待烧杯内无气泡产生用电热板加热样品来将剩余H_2O_2完全挥发。待溶液冷却后





图1 白音恩格尔自然保护区红砂灌丛沙堆

Fig. 1 Nebkhas of *Reaumuria soongorica* in Baiyinengle Nature Reserve

表1 样本灌丛及沙堆基本情况

Tab. 1 Basic condition of sample scrub and nebkhas

沙堆密度/[个·$(100m^2)^{-1}$]	灌丛形态特征参数				沙堆形态特征参数				
	L_g/m	W_g/m	H_g/m	*C*/m	L_d/m	W_d/m	H_d/m	S_d/m^2	V_d/m^3
20.33±5.51	1.86±0.28	1.56±0.08	0.16±0.06	1.71±0.18	1.84±0.34	1.41±0.06	0.38±0.08	2.05±0.46	0.52±0.19

加水、再加1~2 mL10%HCl溶液，用以溶解溶液内碳酸盐类物质，静置24 h后用滴管取上层清液。用MIKPH173型pH计来测样品pH，并加入蒸馏水稀释至中性。利用Analysette 22 Micro Tec Plues型号激光粒度仪对土壤粒度组成测定。

2.3 土壤粒度累积体积频率分布平均距离

平均距离d可反映不同土样的质量差异状况，为土壤粗化提供依据。其公式为：

$$d=\sqrt{\sum(P-\bar{P})/(K-1)} \tag{4}$$

式中：P为某一样地土壤粒度累积频率；$\bar{P}$为样地土壤粒度累积频率平均值；K−1为自由度，K=3。

2.4 土壤粒度参数模型

土壤粒度组成依据美国制土壤粒度分级标准[13]，即极粗砂（1000~2000 μm）、粗砂（500~1000 μm）、中砂（250~500 μm）、细砂（100~250 μm）、极细砂（50~100 μm）、粉粒（2~50 μm）、黏粒（<2 μm），手动筛选出土壤颗粒累积体积分数为5%、10%、16%、25%、50%、75%、84%、90%、95%所对应的颗粒直径用以后期参数计算。依据Udden-Wenworth[14]粒级标准进行分级。

依据Folk-Ward[15]图解法计算粒度参数：平均粒径（d_0）、标准偏差（δ）、偏度（SK）、峰态（K_g）。

依据Tyler和Wheatcraft[16]的方法，粒径体积分布表征土壤分形模型来计算分形维数。

$$\frac{R_i^{3-D}}{R_{max}}=\frac{V(r<R_i)}{V_T} \tag{5}$$

式中：R_i表示测量土壤粒径；R_{max}为最大粒级粒径；$V(r<R_i)$为小于测量粒径的土壤体积；V_T为土壤各粒级体积的总和；D表示土壤分形维数。计算不同粒径（R_i）的体积比对数和粒径比对数，以粒径比对数为横坐标，体积比对数为纵坐标进行线性拟合求出斜率K，分形维数D=3−K。

2.5 土壤养分积累特征计算

采用相对作用强度（Relative Interaction Intense, RII）[17]表示沙堆土壤养分富集情况。

$$RII=(X_n-X_i)/(X_n+X_i) \tag{6}$$

式中：X_n和X_i分别表示灌丛沙堆内外土壤养分含量值。当RII>0时，表示灌丛对该养分含量形成富集，形成“肥岛效应”；当RII<0时，表示灌丛对该养分含量有降低效应，未形成“肥岛效应”。RII距离0值越远表示效应影响越强。

2.6 数据处理及分析

运用Microsoft Excel 2010对试验数据进行前期整理，用DPS数据处理系统对各土壤养分指标进行单因素方差分析，数据表达形式为平均值±标准差。运用Origin 2018进行绘图。

3 结果与分析

3.1 红砂灌丛沙堆土壤粒度组成

由表2可知，各土层深度土壤粒度组成均以砂粒为主，由高到低为：迎风侧（各层均值为95.15%）>丘间空地（93.36%）>背风侧（93.31%）。对砂粒深度分析，除丘间空地0~10 cm土层以粗砂（35.30%）为主，其他均以细砂为主。在各粒级百分含量方面，背风侧土壤极细砂（12.29%）和细砂（65.31%）含量最高（P<0.05），丘间空地的极细砂（8.53%）和细砂

表2 不同土层土壤粒度组成

Tab. 2 Composition of soil particles on different layers /%

土壤类型	土层深度/cm	黏粒	粉粒	砂粒				
				极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂
迎风侧	0~5	1.32±0.11Ba	3.92±0.10Cb	8.35±0.12Bb	58.36±8.35Ba	19.54±0.52Ab	7.06±0.50Bb	1.45±0.58Bab
	5~10	0.39±0.34Bb	2.48±0.17Bc	5.61±0.55ABc	42.31±4.10Bb	24.85±2.18Aa	21.66±5.15Ba	2.70±1.25ABa
	10~15	1.27±0.25Aa	5.38±0.27Aa	10.34±0.19Ca	55.93±11.23Ba	17.46±1.27Ab	8.91±0.99ABb	0.71±0.16Bb
背风侧	0~5	2.11±0.18Ba	6.00±0.14Ba	16.24±8.58Aa	72.12±10.77Aa	1.22±0.36Cc	0.84±0.63Bc	1.45±0.62Ba
	5~10	1.47±0.10Aab	4.34±0.15Ab	7.55±0.13Ac	61.54±10.99Ab	16.00±1.01Ba	7.95±0.30Ca	1.16±0.33Ba
	10~15	1.02±0.57Aa	5.13±0.66Ab	13.07±4.20Ab	62.26±10.20Ab	9.79±0.53Cb	6.66±0.31Bb	2.04±0.81Aa
丘间空地	0~5	3.14±0.83Aa	6.87±0.66Aa	9.12±1.99Ba	24.57±5.85Cb	10.23±2.27Ba	34.76±6.75Aa	11.19±3.23Aa
	5~10	0.46±0.54Bb	2.05±1.02Bb	5.11±1.60Bb	31.82±10.33Bb	13.58±4.84Ba	35.83±10.35Aa	11.03±8.04Aa
	10~15	1.0±0.96Ab	6.17±0.80Aa	11.35±0.54Ba	52.63±1.29Ca	14.83±1.34Ba	11.77±2.53Ab	2.23±0.64Aa

注：大写字母表示同一深度不同类型土壤间差异性显著（P<0.05）；小写字母表示同一类型土壤不同深度土壤间差异性显著（P<0.05）。下同。

(36.34%)含量最低($P<0.05$);迎风侧中砂(20.62%)含量最高($P<0.05$),背风侧中砂(9.00%)含量最低($P<0.05$);丘间空地粗砂(27.45%)和极粗砂(8.15%)含量最高($P<0.05$),背风侧粗砂(5.15%)和极粗砂(1.55%)含量最少($P<0.05$);黏粒和粉粒含量百分比最低,均不超过7%,且差异性各异。0~10 cm土层各粒级间含量差异较大,10~15 cm土层各粒级间含量差异较小。

3.2 红砂灌丛沙堆土壤粒度参数特征

由表3可知,灌丛沙堆与丘间空地各土层d_0范围处于1.45 Φ~3.08 Φ之间,且彼此存在显著差异($P<0.05$)。d_0由低到高为:丘间空地(1.90 Φ)<迎风侧(2.30 Φ)<背风侧(2.79 Φ)。背风侧各土层细砂含量均高于迎风侧;而丘间空地主要粒度组成成分除细砂外,还有大量粗砂存在,其中细砂含量与土层深度呈负相关,粗砂规律相反。灌丛沙堆及丘间空地各土层δ范围处于0.86~2.05之间,灌丛沙堆和丘间空地存在显著差异($P<0.05$)。δ由高到低为:丘间空地(1.52)<迎风侧(1.11)<背风侧(1.00),分别属于分选性较差、分选性较差、分选性中等。结合表2深度分析,灌丛沙堆背风侧土壤粒度组成相对集中,主要由大量细砂加极细砂组成;而迎风侧和丘间空地粒度组成相对分散,迎风侧除细砂和极细砂外还包含大量中砂和粗砂;丘间空地包含一定量极粗砂。SK范围处于−0.42~0.11之间。背风侧0~5 cm土层和丘间空地0~10 cm土层SK范围在−0.26~−0.42之间,属于负偏;其他土壤粒度组成SK为−0.1~0.1之间,属于对称。K_g范围处于0.72~1.76之间,K_g由低到高为:丘间空地(1.05)<迎风侧(1.22)<背风侧(1.69),分别属于宽平、尖窄及很尖窄。D范围处于2.37~2.94之间。D由大到小为:背风侧(2.88)>迎风侧(2.73)>丘间空地(2.61)。

3.3 红砂灌丛沙堆土壤颗粒频率分布

土壤颗粒频率分布曲线可表征土壤粒径分布情况。由图2可知,各土层土壤粒度体积百分含量曲线均为双峰曲线,波峰于100 μm和900 μm处,100 μm处陡峻程度由高至低为:背风侧>迎风侧>丘间空地,900 μm处陡峻程度则相反。土壤累积体积分布曲线均表现为前期平缓,100 μm后趋于陡峻。0~10 cm土层,灌丛沙堆土壤累积体积分布曲线表现出近似"S"形的曲线,且背风侧曲线更陡峻;而丘间空地表现为波浪形,2次起伏分别出现于100 μm和900 μm附近。10~15 cm土层3条曲线基本重合。土壤粒度累积频率间平均距离曲线随土层深度增加趋于平缓,于100~250 μm间达峰值,可认为该区间是研究区易风蚀颗粒范围。

3.4 红砂灌丛沙堆土壤养分空间异质性

灌丛沙堆土壤SOM、AN、AP及AK含量显著高于丘间空地($P<0.05$)(图3)。SOM含量由高到低为:背风侧(2.25 g·kg^{-1})>迎风侧(2.07 g·kg^{-1})>丘间空地(1.60 g·kg^{-1});AN含量为:背风侧(115.97 mg·kg^{-1})>迎风侧(98.34 mg·kg^{-1})>丘间空地(75.24 mg·kg^{-1});AP含量为:背风侧(62.33 mg·kg^{-1})>迎风侧(55.76 mg·kg^{-1})>丘间空地(20.79 mg·kg^{-1});AK含量为:迎风侧(18.27 mg·kg^{-1})>背风侧(16.53 mg·kg^{-1})>丘间空地(12.77 mg·kg^{-1})。

灌丛沙堆土壤AP和AK未因土层深度而表现出显著差异,背风侧的SOM和AN含量则与土层深度呈负相关($P<0.05$)。背风侧0~5 cm土层SOM含量分别较5~10 cm和10~15 cm土层增加17.86%和41.18%;5~10 cm土层背风侧AN含量分别较迎风侧和丘间空地增加65.97%和95.23%($P<0.05$);10~15 cm土层分别增加11.71%和73.14%($P<0.05$)。丘间空地AP和AK含量与土层深度呈负相关($P<0.05$),0~5 cm土层AP分别较5~10 cm和10~15 cm增加

表3 不同土层土壤粒度参数

Tab. 3 Soil particle parameters on different layers

粒度参数	迎风侧土层深度/cm			背风侧土层深度/cm			丘间空地土层深度/cm		
	0~5	5~10	10~15	0~5	5~10	10~15	0~5	5~10	10~15
d_0/Φ	2.47±0.03Ba	1.91±0.15Bb	2.53±0.06Ba	3.08±0.01Aa	2.53±0.03Ac	2.76±0.03Ab	1.78±0.31Cb	1.45±0.46Bb	2.47±0.10Ba
δ	1.04±0.02Bb	1.16±0.07Aa	1.14±0.03Ba	0.86±0.03Bb	1.05±0.02Ba	1.08±0.04Ba	2.05±0.21Aa	1.25±0.03Ab	1.27±0.08Ab
SK	0.04±0.02Aa	0.08±0.04Aa	0.03±0.01Aa	−0.28±0.03ABb	0.02±0.01Aa	0.05±0.03Aa	−0.42±0.03Bb	−0.26±0.02Ab	0.11±0.05Aa
K_g	1.43±0.05Aa	0.85±0.05Bb	1.39±0.17Aa	1.69±0.01Aa	1.76±0.06Aa	1.63±0.26Aa	1.12±0.23Ba	0.72±0.06Cb	1.31±0.14Aa
D	2.83±0.04ABa	2.49±0.08Bb	2.88±0.04Aa	2.94±0.11Aa	2.80±0.02Ab	2.91±0.02Aab	2.76±0.01Ba	2.37±0.25Bb	2.71±0.13Ba

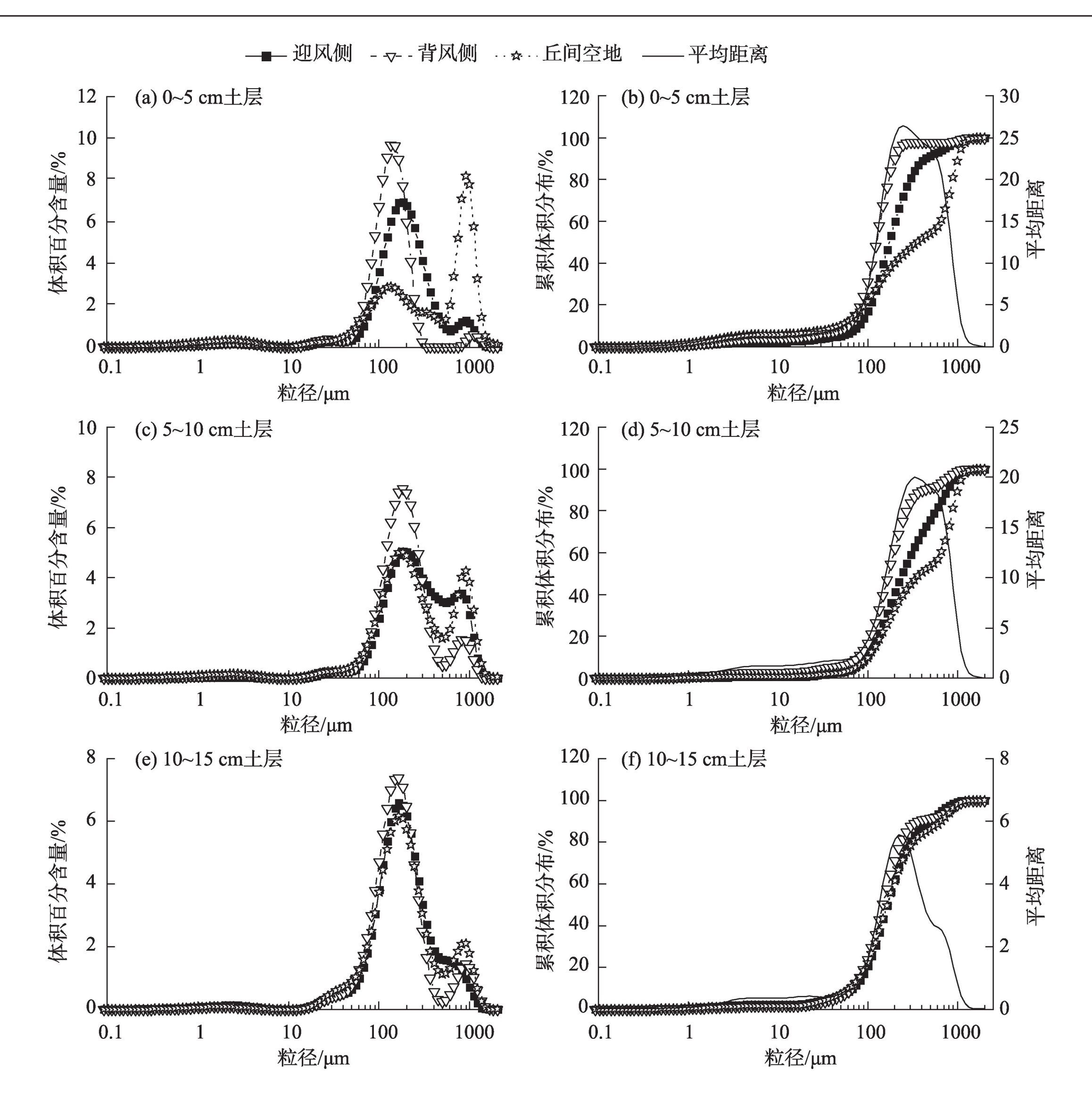


图2　不同土层土壤颗粒频率分布曲线

Fig. 2　Particle size distribution curves on different layers

414.91%和333.93%；AK分别增加11.82%和24.47%。

3.5　红砂灌丛沙堆土壤养分积累特征

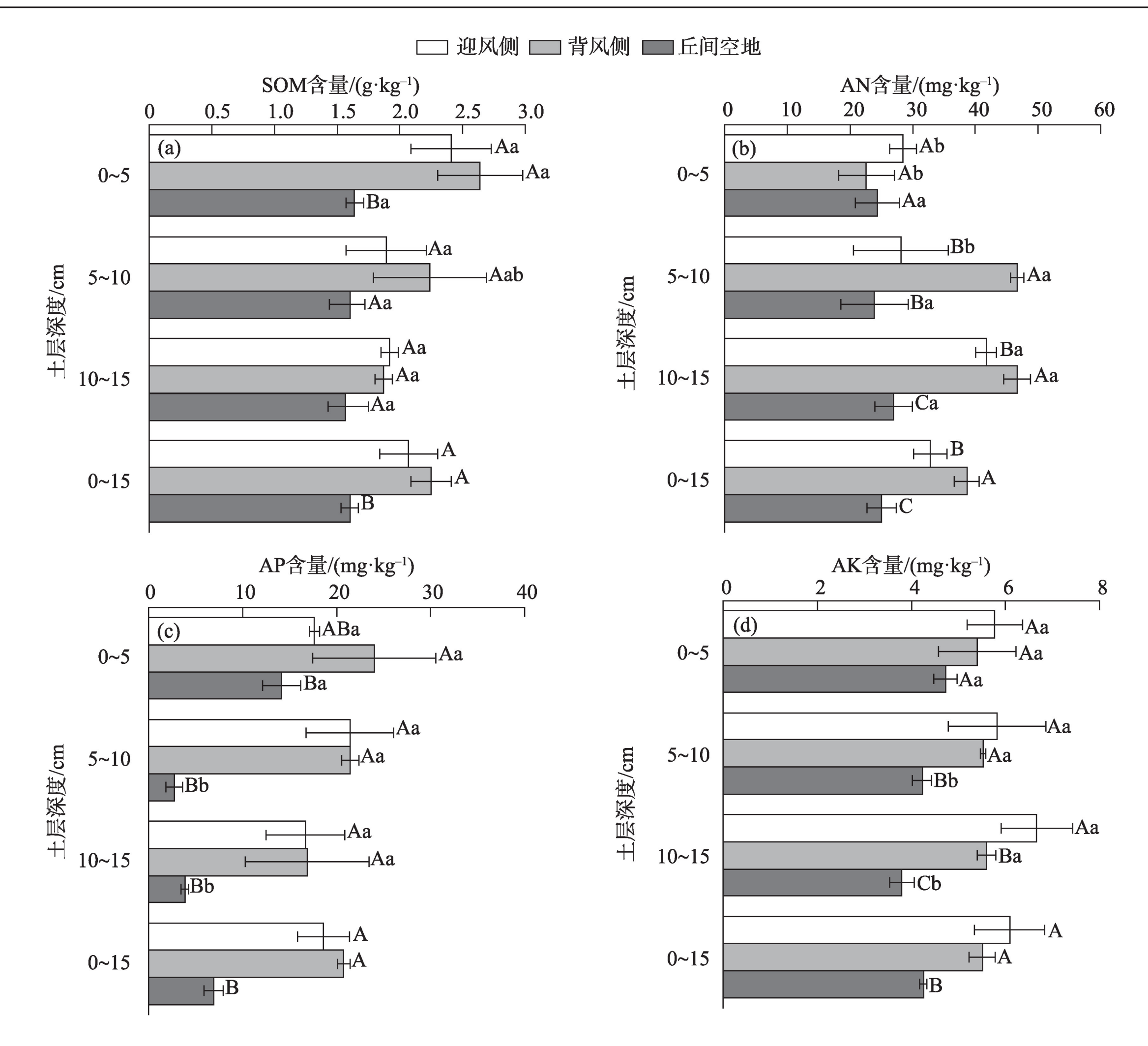
红砂灌丛对土壤养分积累有明显的正效应(图4)，且背风侧累积效果更好。灌丛沙堆背风侧SOM、AN、AP和AK的RII>0，说明背风侧各养分指标均出现养分富集现象。迎风侧AN各土层以及AK的5~15 cm土层养分积累特征表现为RII<0，未形成养分的富集，其他均表现为养分富集。

4　讨论

灌丛沙堆的形成受沙源、植被类型、风力等多方面因素影响[18]，如白刺(*Nitraria tangutorum*)等匍匐生长、分枝多的灌丛更易形成椭圆或盾形沙堆，而油蒿(*Artemisia ordosica*)等垂向生长、分枝少的灌丛更易圆锥形沙堆[19]。研究区位于干旱、半干旱荒漠过渡带，气候干旱、地表含水量低、风速大、沙源丰富，丘间空地d_0为1.9 Φ，被起沙风吹起后主要以悬移或跃移的形式移动，红砂灌丛匍匐生长，株高均值仅为0.16 m，灌丛低矮的形态致使拦截风沙流后沙堆向水平尺度发育，而随灌丛生长沙堆垂直方向也不断增加，最终红砂灌丛形成椭圆形沙堆。

4.1　红砂灌丛沙堆土壤粒度组成

本研究中，研究区灌丛冠幅内外土壤粒度组成均以砂粒为主，灌丛沙堆迎风侧、背风侧和丘间空地的土壤粒度组成依次变细。该结论与苑依笑等[20]结论一致。风蚀主要表现为土壤易蚀性高的细粒物质被吹走，土壤质地粗化[21]。研究区风能资



注:大写字母表示同一深度不同类型土壤间差异性显著(P<0.05);小写字母表示同一类型土壤不同深度土壤间差异性显著(P<0.05)。下同。

图3 不同土层土壤养分含量

Fig. 3 Soil nutrient contents on different layers

源极其丰富,吹蚀未受灌丛保护的丘间空地后形成含有细粒物质的风沙流,而风蚀过程中,随颗粒粒径逐渐增大,启动风速变化表现为先增大后减小,因此大量100~250 μm的丘间空地土壤颗粒随风沙流被吹起[22],其土壤结构变得松散,逐渐趋于沙质化。红砂灌丛的生长增加了地表粗糙程度,风沙流受到灌丛阻拦后风速降低,对沙堆土壤结构的吹蚀作用减弱。同时,由于受红砂灌丛阻挡后风沙流不再饱和,其中的细沙物质沉积于灌丛下方,增加了灌丛沙堆土壤细颗粒含量。

风蚀主要发生在沙堆的迎风侧,背风侧为主要的沉积区[23]。这是由于风沙流吹蚀灌丛沙堆迎风侧过程中,风速沿迎风侧上爬动能逐渐减小,粗颗粒受自身重力影响,在此沉积;风沙流遇坡顶灌丛后风速降至最低,大量细粒物质沉积于坡顶或继续搬运至背风侧;气流在背风侧形成回旋流,风沙流风速再次减弱,输沙率下降,部分细粒物质沉积于背风侧,导致背风侧颗粒较细。该结论与前人对油蒿[24]研究结果较为一致,说明不同种植物虽形态特征与生长方式存在差异,但拦截风沙流改变其运移机制的规律基本相同。灌丛沙堆背风侧、迎风侧和丘间空地分选性依次降低,说明红砂灌丛对沉积物的重新分选作用。背风侧分选性优于迎风侧说明气流影响下的不同部位所受风力侵蚀和沉积作用存在差异,最终影响分选性。峰度与偏度规律变化与分选性相似,也表明了沉积物在不同部位遭遇气流存在差异性,反映了灌丛沙堆表面风沙流侵蚀变化规律[25]。红砂灌丛以覆盖地表、分解风力等形式改变地表流场,降低风蚀对土壤结构破坏作用,同时固定流沙,避免其形成新的沙源[26-27]。研究区风

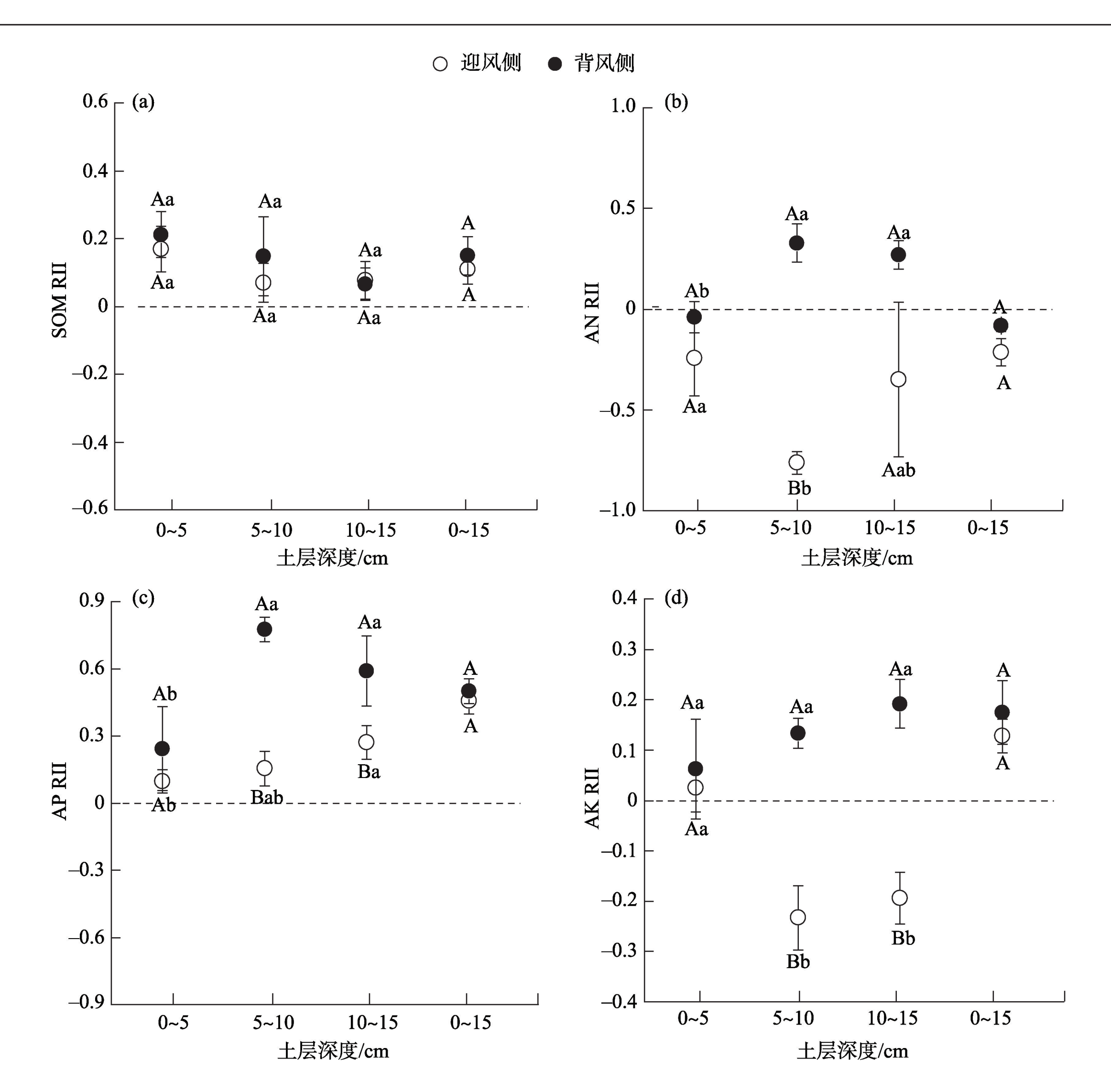


图4 红砂灌丛对不同土层沙堆土壤养分的影响

Fig. 4 Effects of *Reaumuria soongorica* on soil nutrients in sand pile of different soil layers

沙活动频繁，受其影响严重的表层土壤沙物质频繁交换，而深层土壤受风沙活动影响较小。因此0~10 cm土层3条土壤颗粒频率分布曲线差异较大，而10~15 cm土层几乎重合，土壤粒度累积频率间平均距离曲线也随土层深度增加而趋于平缓。

4.2 红砂灌丛土壤养分积累特征

灌丛的生长会改变区域土壤资源空间分布，在对流动沙地的恢复治理中可利用这一原理，将养分聚集于灌丛下方，促进灌丛生长发育进而达到固定流沙的目的[28]。土壤养分集中于细颗粒内[29]，风蚀致使未受保护的丘间空地细颗粒被吹蚀搬运，导致养分流失[30]，而灌丛的拦截作用促使地表颗粒物再分配，细颗粒及凋落物沉积于灌丛下方增加了沙堆土壤养分；灌丛覆盖可避免阳光直射和地表高温，为其自身及其他生物的生存提供更优质的微环境，因此促进了灌丛自身生长并增加沙堆内部生物多样性，进而随灌丛生长发育而产生的大量凋落物及沙堆内部生物的排泄物被微生物分解后提高了沙堆土壤的养分含量[31]。本研究中，沙堆土壤养分含量增加，RII>0，形成"肥岛"效应，与罗维成等[32]结论一致，但背风侧养分积累效果优于迎风侧。该结果与研究区频繁的风沙活动有关，灌丛沙堆虽拦截风沙流沉积大量细颗粒和凋落物，但迎风侧为主要风蚀区，背风侧是主要沉积区，土壤养分含量也随细颗粒和凋落物沉积含量不同而产生差异。本研究还发现，相较于0~5 cm层土壤，深层土壤AN含量更高，这与灌丛根系有关，灌丛通过根际沉积的方式将光合作用产物输入土壤[33]。对灌丛沙堆挖掘后发现，被沙埋的红砂枝系于埋深5~10 cm处开始萌发不定根，根系生长对于土壤氮素转化和吸收有显

著影响[34],最终导致土层间AN含量出现差异。

由于受气候中水分和温度影响,干旱、半干旱区域生态系统碳固存潜力远低于其他地区[35],而灌丛覆盖有效提高土壤碳储量。一方面由于灌丛覆盖地表增加凋落物输入,促进土壤微生物矿化作用,增加土壤肥力和固碳潜力[36]。另一方面,土壤有机碳含量和稳定性与土壤颗粒有密切联系,砂土含量高则不易形成稳定的团聚体,进而无法有效保护土壤有机质,导致降低土壤固碳能力[37]。而灌丛覆盖改变地表流场,沙堆细颗粒有机物沉积含量增加,沙粒中稳定有机碳比例提升,最终固碳潜力提升。

5 结 论

(1)白音恩格尔自然保护区草原化荒漠过渡带土壤粒径组成以细砂为主。灌丛沙堆背风侧、迎风侧和丘间空地土壤粒径组成依次变粗,分选性依次变差,峰态逐渐宽平,分形维数逐渐变小。灌丛沙堆土壤粒径组成含量分布较丘间空地更对称。相较于灌丛沙堆,丘间空地土壤质地呈明显粗化和沙化趋势。

(2)富集于土壤细粒组分的土壤养分随土壤粗化而逐渐降低。灌丛沙堆迎风侧和背风侧AN、AP及AK含量分别较沙堆间空地增加23.49%和35.12%、62.72%和66.45%、30.10%和22.75%($P<0.05$)。

(3)红砂灌丛养分空间分布状况表现为沙堆显著高于丘间空地($P<0.05$)。红砂灌丛对土壤养分积累作用有积极影响,灌丛沙堆存在"肥岛"效应。

参考文献(References):

[1] Wang X, Zhang C, Zhang J, et al. Nebkha formation: Implications for reconstructing environmental changes over the past several centuries in the Ala Shan Plateau, China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 297(3−4): 697−706.

[2] Valiente-Banuet A, Bolongaro-Crevenna A, Briones O, et al. Spatial relationships between cacti and nurse shrubs in a semi-arid environment in Central Mexico[J]. Journal of Vegetation Science, 1991, 2(1): 15−20.

[3] Li J, Zhao Y, Liu H, et al. Sandy desertification cycles in the southwestern Mu Us Desert in China over the past 80 years recorded based on nebkha sediments[J]. Aeolian Research, 2016, 20: 100−107.

[4] 刘冰, 赵文智, 杨荣. 荒漠绿洲过渡带柽柳灌丛沙堆特征及其空间异质性[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1446−1455. [Liu Bing, Zhao Wenzhi, Yang Rong. Characteristics and spatial heterogeneity of *Tamarix ramosissima* Nebkhas at desert-oasis ecotone[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1446−1455.]

[5] Hesp P A, Hernández-Calvento L, Cordero A I H, et al. Nebkha development and sediment supply[J]. Science of the Total Environment, 2021, 773: 1−35.

[6] 董雪, 郝玉光, 辛智鸣, 等. 浑善达克沙地3种典型灌丛固沙能力的比较研究[J]. 林业科学研究, 2020, 33(1): 76−83. [Dong Xue, Hao Yuguang, Xin Zhiming, et al. Comparative study on sand- fixing capability of three typical shrubs in Otindag Sandy Land[J]. Forest Research, 2020, 33(1): 76−83.]

[7] 武胜利, 李志忠, 肖晨曦, 等. 灌丛沙堆的研究进展与意义[J]. 中国沙漠, 2006, 26(5): 734−738. [Wu Shengli, Li Zhizhong, Xiao Chenxi, et al. Research progress on nabkhas and research significance[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(5): 734−738.]

[8] 刘小娥, 苏世平, 李毅. 兰州市南北两山典型灌丛土壤理化性质[J]. 草业学报, 2021, 30(6): 28−39. [Liu Xiao'e, Su Shiping, Li Yi. Soil physical and chemical properties under four typical shrubs found on the northern and southern mountains of Lanzhou City, Northwest China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(6): 28−39.]

[9] 何玉惠, 刘新平, 谢忠奎. 红砂灌丛对土壤和草本植物特征的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(11): 2432−2436. [He Yuhui, Liu Xinping, Xie Zhongkui. Effects of *Reaumuria soongorica* on its underlying soil properties and herb plant characteristics[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(11): 2432−2436.]

[10] 何玉惠, 刘新平, 谢忠奎. 红砂灌丛对土壤盐分和养分的富集作用[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(3): 115−119. [He Yuhui, Liu Xinping, Xie Zhongkui. Enrichment of soil salinity and nutrients under desertification shrub *Reaumuria soongorica*[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment 2015, 29(3): 115−119.]

[11] 党晓宏, 蒙仲举, 高永, 等. 西鄂尔多斯天然荒漠灌丛光合生态适应性[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 435−443. [Dang Xiaohong, Meng Zhongju, Gao Yong, et al. Photosynthetic characteristics and ecological adaptability of desert shrubs in western Ordos[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 435−443.]

[12] Zhang Pujin, Yang Jie, Zhao Liqing, et al. Effect of *Caragana tibetica* nebkhas on sand entrapment and fertile islands in steppe-desert ecotones on the Inner Mongolia Plateau, China[J]. Plant and Soil, 2011, 347(1−2): 79−90.

[13] 高广磊, 丁国栋, 赵媛媛, 等. 生物结皮发育对毛乌素沙地土壤粒度特征的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 115−120. [Gao Guanglei, Ding Guodong, Zhao Yuanyuan, et al. Effects of biological soil crusts on soil particle size characteristics in Mu Us Sandland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 115−120.]

[14] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sedi-

ments[J]. The Journal of Geology, 1922, 30(5): 377−392.
[15] Folk R L, Ward W C. Brazos River Bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3−26.
[16] Tyler Scott W, Wheatcraft Stephen W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(4): 987−996.
[17] Armas Cristina, Ordiales Ramón, Pugnaire Francisco I. Measuring plant interactions: A new comparative index[J]. Ecology, 2004, 85 (10): 2682−2686.
[18] 常兆丰, 张进虎, 石学刚, 等. 沙漠植物分层侧影与积沙丘的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7351−7358. [Chang Zhaofeng, Zhang Jinhu, Shi Xuegang, et al. Initial research on the relationship between sand-mound formation and the layered silhouette of desert plants[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7351−7358.]
[19] 杜建会, 严平, 董玉祥. 干旱地区灌丛沙堆研究现状与展望[J]. 地理学报, 2010, 65(3): 339−350. [Du Jianhui, Yan Ping, Dong Yuxiang. The progress and prospects of nebkhas in arid areas[J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 65(3): 339−350.]
[20] 苑依笑, 王仁德, 常春平, 等. 风蚀作用下农田土壤细颗粒的粒度损失特征及其对土壤性质影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32 (2): 104−109, 119. [Wan Yixiao, Wang Rende, Chang Chunping, et al. Loss characteristics of fine particles by wind in farmland and its effect on soil properties[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(2): 104−109, 119.]
[21] Martinez-Meza Ernesto, Whitford Walter G. Stemflow, throughfall and channelization of stemflow by roots in three Chihuahuan desert shrubs[J]. Journal of Arid Environments, 1996, 32(3): 271−287.
[22] 吴正. 风沙地貌学[M]. 北京: 科学出版社, 1987. [Wu Zheng. Aeolian Geomorphology[M]. Beijing: Science Press, 1987.]
[23] 刘进辉, 王雪芹, 马洋. 沙漠绿洲过渡带柽柳灌丛沙堆-丘间地系统土壤养分空间异质性[J]. 生态学报, 2016, 36(4): 979−990. [Liu Jinhui, Wang Xueqin, Ma Yang. Spatial variation of soil nutrients of *Tamarix ramosissima* nebkhas and interdune areas in a desert-oasis ecotone[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): 979−990.]
[24] 张萍, 哈斯, 吴霞, 等. 单个油蒿灌丛沙堆气流结构的野外观测研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(5): 881−889. [Zhang Ping, Ha Si, Wu Xia, et al. Filed investigation on airflow profile of an *Artemisia ordosica* nebkha dune[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(5): 881−889.]
[25] 李向洁, 李志文, 杜建会, 等. 南昌市厚田沙地蔓荆灌丛沙堆的形态与沉积特征[J]. 地理科学, 2021, 41(11): 2042−2051. [Li Xiangjie, Li Zhiwen, Du Jianhui, et al. Morphology and sedimentary characteristics of *Vitex trifolia* nebkhas in the Houtian Sandy Land of Nanchang City[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41 (11): 2042−2051.]
[26] 武胜利, 李志忠, 惠军, 等. 灌丛沙堆表面压力分布特征的实验研究[J]. 干旱区地理, 2006, 29(6): 790−796. [Wu Shengli, Li Zhizhong, Hui Jun, et al. Study on the distribution character of surface pressure of nabkha in wind-tunnel imitative experiment[J]. Arid Land Geography, 2006, 29(6): 790−796.]
[27] 曹媛, 杨新国, 陈林, 等. 柠条引入对沙化草地土壤颗粒组分的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1437−1446. [Cao Yuan, Yang Xinguo, Chen Lin, et al. Effects of *Caragana intermedia* on soil particles in desertified grassland[J]. Arid Zone Research, 2020, 37 (6): 1437−1446.]
[28] 李新荣. 干旱沙区土壤空间异质性变化对植被恢复的影响[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2005, 35(4): 361−370. [Li Xinrong. Effects of soil spatial heterogeneity on vegetation restoration in arid sandy region[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2005, 35(4): 361−370.]
[29] Dean W R J, Milton S J, Jeltsch F. Large trees, fertile islands, and birds in arid savanna[J]. Journal of Arid Environments, 1999, 41 (1): 61−78.
[30] 王晓凌, 陈明灿, 易现峰, 等. 垄沟覆膜集雨系统垄宽和密度效应对玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 40−47. [Wang Xiaoling, Chen Mingcan, Yi Xianfeng, et al. Effects of ridge width and planting density on corn yields in rainwater-harvesting system with plastic film mulching on ridge[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(8): 40−47.]
[31] 孙特生, 李文彦, 刘继亮. 黑河中游荒漠绿洲人工梭梭土壤养分特征[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(5): 179−185. [Sun Tesheng, Li Wenyan, Liu Jiliang. Soil nutrient characteristics of *Haloxylon ammodendron* plantation in a desert-oasis region in the middle reaches of Heihe River Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(5): 179−185.]
[32] 罗维成, 赵文智, 任珩, 等. 不同气候区灌丛沙堆形态及土壤养分积累特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(2): 191−199. [Luo Weicheng, Zhao Wenzhi, Ren Heng, et al. Nebkha morphological characteristics and soil nutrition content in three regions with different climates in North China[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(2): 191−199.]
[33] 苏永中, 赵哈林, 张铜会. 几种灌木、半灌木对沙地土壤肥力影响机制的研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(7): 802−806. [Su Yongzhong, Zhao Halin, Zhang Tonghui. Influencing mechanism of several shrubs and subshrubs on soil fertility in Keerqin sandy land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(7): 802−806.]
[34] 常帅, 于红博, 张巧凤, 等. 锡林郭勒草原土壤速效氮空间变异分析[J]. 草业学报, 2021, 30(7): 11−21. [Chang Shuai, Yu Hongbo, Zhang Qiaofeng, et al. Analysis of spatial variability of soil available nitrogen in Xilingol grassland[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(7): 11−21.]
[35] Albrecht A, Serigne T K. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2003, 99: 15−27.

[36] Peichl M, Thevathasan N V, Gordon A M, et al. Carbon sequestration potentials in temperate tree-based inter-cropping systems, southern Ontario, Canada[J]. Agroforestry Systems, 2006, 66: 243−257.

[37] Takimoto A, Nair V D, Nair P K R. Contribution of trees to soil carbon sequestration under agroforestry systems in the West African Sahel[J]. Agroforestry Systems, 2009, 76: 11−25.

Soil mechanical composition and soil nutrient content of *Reaumuria soongorica* nebkhas

LI Xiaole[1], WEI Yajuan[1], DANG Xiaohong[1,2], DAI Yuzhi[3], ZHAI Bo[1], CHI Xu[1], WU Huimin[1]

(1. College of Desert Management, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 2. Hangjin National Positioning Observation and Research Station of Desert Ecosystem, Ordos 017400, Inner Mongolia, China; 3. Hohhot Weather Station, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China)

Abstract: Understanding the effects of desert shrubs on the soil structure and nutrient spatial heterogeneity of nebkhas is important for maintaining the stability of desert ecosystems and preventing regional desertification. In this study, soil grain-size composition and soil nutrient accumulation of *Reaumuria soongorica* in the steppe desert transition zone of Baiyinengel Nature Reserve, Hangjin Banner, Ordos City, were analyzed. (1) The soil was mainly fine sand (content ranging from 36.34% to 65.31%); the clay and silt content was less than 7.00%. (2) *Reaumuria soongorica* protects nebkhas from wind erosion and also plays a role in fixing quicksand. The sediment of nebkhas tended to be refined, and particle sorting became successively worse from the leeward side to the windward side and the open space between nebkhas. The particle distribution peak became wider and flatter, and the fractal dimension became smaller. The distribution of soil particle size composition in the shrub nebkha was more symmetrical than that in the open space between the mounds. (3) The soil organic matter (SOM), alkaline hydrolyzed nitrogen (AN), available phosphorus (AP), and available potassium (AK) contents on the windward and leeward sides of the nebkha increased by 29.37% and 40.63%, 23.49% and 35.12%, 62.72% and 66.45%, 30.10% and 22.75% (P<0.05), respectively, and RII (Relative Interaction Intense) > 0. Under the influence of wind erosion and plant feedback, nutrients were enriched in nebkhas, forming "fertile islands."

Keywords: *Reaumuria soongorica*; nebkhas; soil mechanical composition; soil nutrient content